

В.И. Данильченко, Е.В. Данильченко, В.М. Курейчик

**МЕТАЭВРИСТИЧЕСКИЙ МЕТОД ОПТИМИЗАЦИИ НА ОСНОВЕ
МОДЕЛИ ПОВЕДЕНИЯ СТВОЛОВЫХ КЛЕТОК***

Рассматриваются методы оптимизации, которые основаны на процессах, происходящих в природе. Такие методы стали все чаще применяться для решения сложных задач. Но у таких методов существуют некоторые недостатки, что стимулирует разработку новых и более совершенных методов оптимизации. Решение NP полных задач требует оптимальных методов, которые будут отвечать всем требованиям проектирования, поэтому существует необходимость в разработке новых и более совершенных методик решения данного класса задач. В качестве такого метода в работе авторами предлагается метод оптимизации на основе модели поведения стволовых клеток в естественной среде. Проведенные исследования предлагаемого метода дают решения, которые смогут преодолеть многие недостатки стандартных подходов оптимизации, такие как: попадание в локальный оптимум или низкую скорость сходимости алгоритма на основе рассматриваемого метода. Цель данной работы заключается в разработке метода оптимизации и алгоритма на его основе, для решения сложной целевой функции. Научная новизна заключается в разработке метода оптимизации на основе модели поведения стволовых клеток для решения NP полных задач. В работе преследуется задача создать условия для оптимального поиска решения сложных функций путем применения, метода поиска и на его основе алгоритма поведения стволовых клеток. Практическая ценность работы заключается в разработке нового метаэвристического метода оптимизации для эффективного решения NP полных задач. Так же в работе проведён сравнительный анализ с известными конкурентами. Главное отличие предложенного метода от других известных методов в применении нового подхода бионспирированного поиска на основе поведения стволовых клеток, которые, как показало практическое сравнение, имеет преимущество над известными аналогами. Итоги практического сравнения методов и алгоритмов на их основе, показали преимущества предложенного в работе подхода на известных тестовых функциях. Проведя анализ проблемы создания методов, алгоритмов и программного обеспечения для решения NP полных задач, можно сделать вывод, что в настоящее время разработка подобных подходов является актуальной задачей.

Бионспирированный поиск; графы и гиперграфы; эволюционные вычисления; САПР; проектирование электронных средств; мета-эвристическое моделирование; методы оптимизации; стволовых клеток.

V.I. Danilchenko, Y.V. Danilchenko, V.M. Kureichik

**METAHEURISTIC OPTIMIZATION METHOD BASED ON THE STEM CELL
BEHAVIOR MODEL**

The paper discusses optimization methods that are based on processes occurring in nature. Such methods have become increasingly used to solve complex problems. However, such methods have some drawbacks, which stimulates the development of new and more advanced optimization methods. Solving NP complete problems requires optimal methods that will meet all design requirements, so there is a need to develop new and more advanced methods for solving this class of problems. As such a method, the authors propose an optimization method based on a model of the behavior of stem cells in the natural environment. The conducted studies of the proposed method provide solutions that can overcome many of the shortcomings of standard optimization approaches, such as getting into the local optimum or low convergence rate of the algorithm based on the method under consideration. The purpose of this work is to develop an optimization method and an algorithm based on it for solving a complex objective function. The scientific novelty lies in the development of an optimization method based on the stem cell behavior model for solving NP complete problems. The aim of the work is to create conditions for the

* Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-37-90151.

optimal search for a solution to complex functions by applying the search method and, based on it, an algorithm for the behavior of stem cells. The practical value of the work lies in the development of a new metaheuristic optimization method for the efficient solution of NP complete problems. Also in the work, a comparative analysis with well-known competitors was carried out. The main difference of the proposed method from other known methods is the use of a new approach of bioinspired search based on the behavior of stem cells, which, as shown by practical comparison, has an advantage over known analogues. The results of a practical comparison of methods and algorithms based on them showed the advantages of the approach proposed in the work on known test functions. After analyzing the problem of creating methods, algorithms and software for solving NP complete problems, we can conclude that the development of such approaches is currently an urgent task.

Biospirited search; graphs and hypergraphs; evolutionary computing; CAD; electronic design; meta-heuristic modeling; optimization methods; stem cells.

Введение. Метаэвристические методы в большинстве основаны на естественных механизмах биологических систем или физические механизмы. В качестве примера меланомы биологических систем можно рассматривать генетический алгоритм, оптимизация роя частиц и т.п., а для физических систем представителем является подход имитации отжига. Вероятно, основной причиной выбора и разработки этих подходов является простая реализация и потенциал их развития.

Одним из самых распространённых подходов к оптимизации можно рассматривать методы генетического поиска. Данные методы оптимизации, были предложены Холландом 1975 [1]. Такой подход стал популярным из-за высокого соотношения простоты использования и качества решения. Такой метод имеет случайную основу в поиске, что значит применение его в современных задачах неэффективно без существенных модернизаций. Такие методы берут свое начало в узконаправленных биологических механизмах, чаще всего такие механизмы входят в теорию генетики и мутации. Такие методы проводят оптимизационный поиск наилучшего решения, чем начальный набор альтернативного решения. Одним из основных принципов генетических алгоритмов является их предрасположенность работать в параллельном режиме и способность поиска сверхбольших и сложных областей [2–4].

Для сравнения с предлагаемым методом оптимизации в работе рассматривается еще один известный метод оптимизации роем частиц [5]. Данный подход является популярным в непрерывных и дискретных задачах оптимизации функции. Алгоритм на основе данного метода раскладывается на отдельные частицы, где каждая из них рассматривается как член популяции или агент. Такая популяция способна аккумулировать опыт, полученный от отдельных агентов и от популяции в целом, что дает возможность ускорить условный выход на оптимум. Особенностью такого подхода заключается в увеличении шанса выйти на глобальный оптимум вычисляемой функции в прямой зависимости от количества посторенний [5–7].

Рассмотрим еще один известный метод оптимизации имитации отжига. Основной идеей такого подхода является моделирование процесса минимизации целевой функции в процессе охлаждения материала пока не будет достигнут результат [7–9]. Такой подход основывается на первом полученном решении, которое имеет особую роль и изменяется относительно поставленной задачи.

Далее в работе рассматривается метод оптимизации на основе пчелиной колонии. Такой подход представляет собой моделирование социальных отношений медоносных пчел [11]. Основной тип поведения при оптимизации основан на коллективном поиске источника пищи. Основной отличительной чертой такого метода является интеллект коллективного роя, который характеризуется самоорганизацией и разделением труда. Именно групповое взаимодействие и является ключевым моментом в таком подходе к получению оптимального решения за полиномиальное время.

Автор в данной работе предлагает сравнить разработанный метод оптимизации на основе модели поведения стволовых клеток с известными и зарекомендовавшими себя подходами. Для этого в работе будет использована бенчмарка на основе функ-

ции Розенброка, которая достаточно может быть реализована и может дать достаточно сведений чтоб доказать лучшую производительность предлагаемого решения по сравнению с другими. По итогам теста алгоритм на основе предложенного метода оптимизации на основе модели поведения стволовых клеток показал лучшую скорость сходимости и большую точность в достижении оптимального отклика по сравнению с другими рассмотренными алгоритмами оптимизации.

Метод основанный на поведении стволовых клеток. Стволовые клетки находятся во всех многоклеточных органах, где они могут стать полноценным органом. Исследования в этой области проводили А. Эрнест, Мак Каллох и Джеймс Э. Тилль [2, 15], и их деятельность была сосредоточена на исследовании эмбриональных стволовых клетках. В своем исследовании они пришли к важному выводу, что стволовые клетки могут вызывать изменения в некоторых органах тела. Проблемы некоторых органов взрослого человека также можно решить, используя способность эмбриональных стволовых клеток делиться и становиться полноценным органом. В работе автор представляет схему оптимизации с использованием двух важных характеристик стволовых клеток в реальном мире, включая их способность к самовоспроизведению. Предлагаемый метод похож на другие алгоритмы оптимизации в том, что он основан на популяции и идее эволюционного процесса, но отличается тем, что использует минимальные ограничения и простую реализацию по сравнению с другими известными методами оптимизации.

Алгоритм основанный на поведении стволовых клеток. Алгоритм стволовых клеток представляется следующим образом: формируется исходная матрица, которая состоит из переменных задачи, а именно присущих свойств стволовых клеток.

$$SC_i = [SC_{i1}, SC_{i2}, \dots, SC_{iD}], i = 1, 2, \dots, S, \quad (1)$$

где S представляет собой общее количество ячеек, участвующих в процессе реализации алгоритма, и размер D проблемного пространства.

В предлагаемом алгоритме начальная совокупность выбирается из существующего множества, а затем в последующих итерациях новые клетки добавляются к уже имеющийся совокупности на определенное процентное соотношение. Этот конкретный процент приращения определяется перед реализацией алгоритма. Следовательно, алгоритм начинается с использования только части всех клеток. Стоит отметить, если выбрать большую популяцию на раннем этапе реализации алгоритма оптимизации, это приведет к увеличению необходимым итераций, большим затратам времени и алгоритм может попасть в локальный минимум.

Исходная популяция выбирается так, чтобы ее распределение было равномерным и случайным в рабочем пространстве. Тогда целевая функция для каждой ячейки имеет вид:

$$SC_i = \begin{cases} \frac{1}{a+f_i}, f_i \geq 0 \\ 1 + |f_i|, f_i < 0, \end{cases} \quad (2)$$

где a – положительное случайное число в интервале $[0, 1]$, но в большинстве количества случаев $a = 1$. Значение каждой ячейки нормируется как:

$$nSC_n = \max SC_i - SC_n, \quad (3)$$

где SC_n – значение n -ой стволовой клетки, $\max SC_i$ – максимальное значение среди всех стволовых клеток, nSC_n – нормализованное значение n -ой стволовой клетки.

Чем выше значение ячейки – тем слабее сама ячейка, поэтому ее нормализованное значение ниже. Одним из основных параметров при определении наилучшей стволовой клетки (оптимального решения) является относительная эффективность, иными словами способность каждой клетки дифференцировать разные типы клеток, например, клетки костного мозга и клетки крови.

$$P_n = \frac{nSC_n}{\sum_{i=1}^S nSC_i} \quad (4)$$

где $\sum_{i=1}^S nSC_i$ – общее значение стволовых клеток. С другой точки зрения, P_n – относительная сила (еще ее называют выносливостью) n -ой стволовой клетки. После определения относительной силы каждой ячейки ее значение сохраняется в памяти каждой ячейки. После каждая из них обменивается своими параметрами, сохраненной в ее памяти, затем полученная информация классифицируется в таблице от самого высокого до самого низкого порядка.

Части ячеек, расположенных в верхнем диапазоне таблицы, дана возможность участвовать в процессе самообновления, и они образуют часть рабочей совокупности в следующей итерации алгоритма. Остальная часть населения выбирается случайным способом из ячеек, не имеющих информации из рабочего пространства. Процесс самообновления осуществляется по принципу:

$$SC_{Optimum}(t + 1) = \xi \cdot SC_{Optimum}(t), \quad (5)$$

где t – представляет каждый цикл (итерацию) и ξ – случайное число в интервале $[0; 1]$.

Для упрощения реализации процесса самообновления, который проходит аналогично и взаимно, значение ξ принимается 0,96 в случае аналогичного самообновления и ξ принимается 0,01 для взаимного самообновления. Так же в некоторых задачах, где размер рабочего пространства велик или задача является NP полной, есть необходимость использовать оба процесса самообновления одновременно, это даст возможность предотвратить единообразие в достижении оптимального решения. При работе с этим алгоритмом в задачах с одним критерием, целью является формирование органа и алгоритм будет выполняться до состояния целого органа. Но когда целью является получение оптимальных значений двух или более критериев, цель состоит в том, чтобы достичь двух или более полных органов, это подтверждает многомерные свойства стволовых клеток.

Экспериментальные результаты. Для оценки предложенного алгоритма на основе моделирования поведения стволовых клеток в естественной среде, проведены сравнительные тесты по основной зависимости числа итераций от значения ЦФ. Для теста использована бенчмарка на основе функции Розенброка. Характеристики функции для теста: 50 запусков, где было использовано множество случайных переменных для инициализации новых наборов альтернативных решений, каждый из которых содержит 5000 итераций, при объеме популяции 100 особей. На рис. 1 показан результат теста.

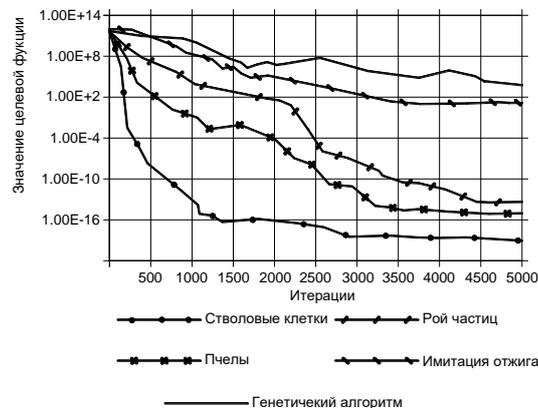


Рис. 1. Результат теста на функции Розенброка

Тест показал, что предложенный алгоритм имеет способность выхода из локального минимума в проблемном пространстве и достигает глобального минимума. Таким образом, есть возможность получить оптимальную производительность, используя предлагаемый алгоритм для оптимизации NP полных и многомерных функций и задач.

Заключение. В работе предложен новый метаэвристический метод и алгоритм на его основе для решения NP полных и многомерных функций и задач. Новый алгоритм основан на том, что стволовые клетки могут вызывать изменения в некоторых органах тела и (или) могут стать полноценным органом. Проведен тест на функции Розенброка и полученные результаты по сравнению с другими оптимизационными алгоритмами. Предложенный алгоритм колонии стволовых клеток имеет более ранний выход в область оптимальных решений, по сравнению с другими рассмотренными алгоритмами. С учетом параметров заданной популяции и специфики решаемой задачи, алгоритм достигает области оптимальных решений в диапазоне [1000–1500] итераций. Тест показал лучшую производительность предложенного алгоритма, а именно, в конечной точке останова, по критерию количества итераций (5000 итерации), значение целевой функции Розенброка менее 10^{-16} , где аналогичные алгоритмы показывают значение более 10^{-16} . В решении задачи минимизации функции Розенброка, предложенный алгоритм показал наилучшие результаты по сравнению с другими рассмотренными алгоритмами, что позволяет отметить его потенциал в решении других NP – полных задач.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Данильченко В.И., Курейчик В.М. Генетический алгоритм планирования размещения СБИС // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2019. – № 2 (204). – С. 26-34.
2. Данильченко В.И., Данильченко Е.В. Курейчик В.М. Классификация и анализ методов решения задачи размещения СБИС // Информатика, вычислительная техника и инженерное образование. – 2018. – Вып. 1.
3. Danilchenko V.I., Danilchenko Y.V., Kureichik V.M. Bio-inspired Approach to Microwave Circuit Design // IEEE EAST-WEST DESIGN & TEST SYMPOSIUM. EWDTs 2020. – P. 362-366. – DIO: 10.1109/EWDTS 50664.2020.9224737.
4. Калентьев А.А., Гарайс Д.В., Добуш И.М., Бабак Л.И. Структурно-параметрический синтез СВЧ транзисторных усилителей на основе генетического алгоритма с использованием моделей монолитных элементов // Доклады ТУСУРа. – Декабрь 2012. – № 2 (26), Ч. 2. – С. 104-112.
5. Tang, Maolin and Yao, Xin. A memetic algorithm for VLSI floorplanning // IEEE Transactions on Systems, Man, And Cybernetics–Part B: Cybernetics. – 2007. – No. 37 (1).
6. Горяинов А.Е., Добуш И.М., Бабак Л.И. Построение параметрических моделей пассивных компонентов СВЧ монолитных интегральных схем с использованием программы Extraction-P // Доклады ТУСУРа. – 2012. – № 2 (26). – С. 98-103.
7. Kokolov A.A., Salnikov A.S., Sheyerman F.I. and Babak L.I. Broadband Double-Balanced SiGe BiCMOS Mixer With Integrated Asymmetric MBaluns // Int. Conf. “Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines” (Dynamics-2017), Omsk, Russia, 2017 (accepted for publication).
8. Bockleemann D.E. and Eisenstadt W.R. Combined Differential and Common-Mode Scattering Parameters: Theory and Simulation // IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques. – July 1995. – Vol. MTT-43. – No. 7. – P. 520-523.
9. Голицын Г.А. Петров В.М. Информация и биологические принципы оптимальности: Гармония и алгебра живого. – М.: КомКнига 2005.
10. Колесов Ю.Б., Сениченков Ю.Б. Моделирование систем. Динамические и гибридные системы: учеб.- метод. пособие. – СПб.: БХВ-Петербург, 2006.
11. Abraham A., Grosan G., Ramos V. Swarm Intelligence in Data Mining. – Berlin. Heidelberg: SpringerVerlag, 2007. – 267 p.
12. Курейчик В.В., Курейчик В.М., Сороколетов П.В. Анализ и обзор моделей эволюции // Известия Российской академии наук. Теория и системы управления. – 2007. – № 5. – С. 114-126.

13. Родзин С.И., Курейчик В.В. Теоретические вопросы и современные проблемы развития когнитивных биоинспирированных алгоритмов оптимизации (обзор) // Кибернетика и программирование. – 2017. – № 3. – С. 51-79.
14. Об управлении на основе генетического поиска // Автоматика и телемеханика. – 2001. – № 10. – С. 174-187.
15. Бова В.В., Курейчик В.В. Интегрированная подсистема гибридного и комбинированного поиска в задачах проектирования и управления// Известия ЮФУ. Технические науки. – 2010. – № 12 (113). – С. 37-42.
16. Гатчин Ю.А., Коробейников А.Г. Методы представления математических моделей в САПР при концептуальном и инфологическом моделировании // IEEE AIS-03, CAD-2003. Интеллектуальные системы, интеллектуальные САПР. – М.: Физматлит, 2003. – Т. 2. – С. 35-41.
17. Бершадский А.М. Применение графов и гиперграфов для автоматизации конструкторского проектирования РЭА и ЭВА. – Саратов: Изд-во СГУ, 1993.
18. Новиков Ф.А. Дискретная математика для программистов. – СПб.: Питер, 2000.
19. Акимов О.Е. Дискретная математика: логика, группы, графы, фракталы. – М.: Издатель АКИМОА, 2005.
20. Берштейн Л.С., Боженик А.В. Нечеткие графы и гиперграфы. – М.: Научный мир, 2005.

REFERENCES

1. Danil'chenko V.I., Kureychik V.M. Geneticheskiy algoritm planirovaniya razmeshcheniya SBIS [Genetic algorithm of VLSI placement planning], *Izvestie YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2019, No. 2 (204), pp. 26-34.
2. Danil'chenko V.I., Danil'chenko E.V. Kureychik V.M. Klassifikatsiya i analiz metodov resheniya zadachi razmeshcheniya SBIS [Classification and analysis of methods for solving the VLSI placement problem], *Informatika, vychislitel'naya tekhnika i inzhenernoe obrazovanie* [Informatics, computer engineering and engineering education], 2018, Issue 1.
3. Danilchenko V.I., Danilchenko Y.V., Kureichik V.M. Bio-inspired Approach to Microwave Circuit Design, *IEEE EAST-WEST DESIGN & TEST SYMPOSIUM. EWDTS 2020*, pp. 362-366. DOI: 10.1109/EWDTS 50664.2020.9224737.
4. Kalent'ev A.A., Garays D.V., Dobush I.M., Babak L.I. Strukturno-parametricheskii sintez SVCh tranzistornykh usiliteley na osnove geneticheskogo algoritma s ispol'zovaniem modeley monolitnykh elementov [Structural-parametric synthesis of microwave transistor amplifiers based on a genetic algorithm using models of monolithic elements], *Doklady TUSURa* [Proceedings of TUSUR University], 2012, No. 2 (26), Part 2, pp. 104-112.
5. Tang, Maolin and Yao, Xin. A memetic algorithm for VLSI floorplanning, *IEEE Transactions on Systems, Man, And Cybernetics–Part B: Cybernetics*, 2007, No. 37 (1).
6. Goryainov A.E., Dobush I.M., Babak L.I. Postroenie parametricheskikh modeley passivnykh komponentov SVCh monolitnykh integral'nykh skhem s ispol'zovaniem programmy Extraction-P [Construction of parametric models of passive components of microwave monolithic integrated circuits using the Extraction-P program], *Doklady TUSURa* [Proceedings of TUSUR University], 2012, No. 2 (26), pp. 98-103.
7. Kokolov A.A., Salnikov A.S., Sheyerman F.I. and Babak L.I. Broadband Double-Balanced SiGe BiCMOS Mixer With Integrated Asymmetric MBaluns, *Int. Conf. "Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines"* (Dynamics-2017), Omsk, Russia, 2017 (accepted for publication).
8. Bocklemann D.E. and Eisenstadt W.R. Combined Differential and Common-Mode Scattering Parameters: Theory and Simulation, *IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques*, July 1995, Vol. MTT-43, No. 7, pp. 520-523.
9. Golitsyn G.A. Petrov V.M. Informatsiya i biologicheskie printsipy optimal'nosti: Garmoniya i algebra zhivogo [Information and biological principles of optimality: Harmony and algebra of the living]. Moscow: KomKniga 2005.
10. Kolesov Yu.B., Senichenkov Yu.B. Modelirovanie sistem. Dinamicheskie i gibridnye sistemy: ucheb.- metod, posobie [Modeling of systems. Dynamic and hybrid systems: an educational and methodological guide]. Saint Petersburg: BKhV-Peterburg, 2006.

11. *Abraham A., Grosan G., Ramos V.* Swarm Intelligence in Data Mining. Berlin. Heidelberg: SpringerVerlag, 2007, 267 p.
12. *Kureychik V.V., Kureychik V.M., Sorokoletov P.V.* Analiz i obzor modeley evolyutsii [Analysis and review of evolution models], *Izvestiya Rossiyskoy akademii nauk. Teoriya i sistemy upravleniya* [Proceedings of the Russian Academy of Sciences. Theory and control systems], 2007, No. 5, pp. 114-126.
13. *Rodzin S.I., Kureychik V.V.* Teoreticheskie voprosy i sovremennye problemy razvitiya kognitivnykh bioinspirirovannykh algoritmov optimizatsii (obzor) [Theoretical issues and modern problems of the development of cognitive bioinspired optimization algorithms (review)], *Kibernetika i programmirovaniye* [Cybernetics and programming], 2017, No. 3, pp. 51-79.
14. Ob upravlenii na osnove geneticheskogo poiska [About management based on genetic search], *Avtomatika i telemekhanika* [Automation and telemechanics], 2001, No. 10, pp. 174-187.
15. *Bova V.V., Kureychik V.V.* Integrirovannaya podsystema gibridnogo i kombinirovannogo poiska v zadachakh proektirovaniya i upravleniya [Integrated subsystem of hybrid and combined search in design and management tasks], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2010, No. 12 (113), pp. 37-42.
16. *Gatchin Yu.A., Korobeynikov A.G.* Metody predstavleniya matematicheskikh modeley v SAPR pri kontseptual'nom i infologicheskom modelirovanii [Methods of representation of mathematical models in CAD in conceptual and infological modeling], *IEEE AIS-03, CAD-2003. Intellektual'nye sistemy, intellektual'nye SAPR* [IEEE AIS-03, CAD-2003. Intelligent systems, intelligent CAD]. Moscow: Fizmatlit, 2003, Vol. 2, pp. 35-41.
17. *Bershadskiy A.M.* Primeneniye grafov i gipergrafov dlya avtomatizatsii konstruktorskogo proektirovaniya REA i EVA [Application of graphs and hypergraphs for automation of design of REA and EVA]. Saratov: Izd-vo SGU, 1993.
18. *Novikov F.A.* Diskretnaya matematika dlya programmistov [Discrete mathematics for programmers]. Saint Petersburg: Piter, 2000.
19. *Akimov O.E.* Diskretnaya matematika: logika, gruppy, grafy, fraktaly [Discrete mathematics: logic, groups, graphs, fractals]. Moscow: Izdatel' AKIMOА, 2005.
20. *Bershteyn L.S., Bozhenyuk A.V.* Nechetkie grafy i gipergrafy [Fuzzy graphs and hypergraphs]. Moscow: Nauchnyy mir, 2005.

Статью рекомендовал к опубликованию к.т.н. Ю.П. Волощенко.

Данильченко Евгения Владимировна – Южный федеральный университет; e-mail: lipkina@sfedu.ru; г. Таганрог, Россия; тел.: +79525691761; кафедра САПР.

Данильченко Владислав Иванович – e-mail: vdanielchenko@sfedu.ru; тел.: +79526088561; кафедра САПР.

Курейчик Виктор Михайлович – e-mail: vmkureychik@sfedu.ru; тел.: +79282132730; кафедра САПР; д.т.н.; профессор.

Danilchenko Yevgenia Vladimirovna – Southern Federal University; e-mail: lipkina@sfedu.ru; Taganrog, Russia; phone: +79525691761; computer-aided design of department; postgraduate.

Danilchenko Vladislav Ivanovich – e-mail: vdanielchenko@sfedu.ru; phone: +79526088561; computer-aided design of department; postgraduate.

Kureichik Viktor Mikhailovich – e-mail: kur@tgn.sfedu.ru; phone: +78634311487; computer-aided design of department; dr. of eng. sc.; professor.